

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

# **Problematika měření rosného bodu spalin**

Dew Point Measurement of Combustion  
Products

Student:

Adam Janusz

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

## Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Janusz**  
Studijní program: **B3907 Energetika**  
Studijní obor: **3907R012 Energetika 21.století**  
Téma: **Problematika měření rosného bodu spalin**  
**Dew Point Measurement of Combustion Products**  
Jazyk vypracování: **čeština**

### Zásady pro vypracování:

V rámci závěrečné práce vypracujte návrh metodiky měření rosného bodu spalin na výstupu z vybraných energetických zařízení. Součástí práce bude praktické změření a zhodnocení výsledků měření na vybraném zařízení.

Práce bude obsahovat:

1. Rešerši dané problematiky
2. Praktické provedení měření sondou LAND
3. Zhodnocení výsledků měření a návrh využití těchto výsledků

### Seznam doporučené odborné literatury:


JANEBA, J., KARTÁK, K. Výpočty kotlů a parogenerátorů. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1985.  
DLOUHÝ, T. Výpočty kotlů a spalínových výměníků. Skripta ČVUT Praha, 2005.  
RAJNIAK, I. a kol. Tepelno-energetické a emisné merania. Bratislava: Svornosť, 1997. ISBN 80-88683-20-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o technických parametrech kotle získaných od firmy Energetika Třinec a.s., Třinec, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Návsi dne 20. května 2019



.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́доміі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Návsí dne 20. května 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Adam Janusz

Adresa trvalého pobytu autora práce: Kaštanová 867, Návsí 739 92

#### Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi, za veškerou pomoc při jejím zpracování, za možnost zúčastnit se praktických měření a za poskytnutou zprávu o měření potřebnou pro napsání a vyhodnocení výsledků měření.

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JANUSZ, A. *Problematika měření rosného bodu spalin: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2019, 50 s. Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Bakalářská práce se zabývá měřením rosného bodu spalin na kotli K1. V první části práce je popsán kotel K1, popis ohřívače vzduchu, rozložení teplot v prostoru nad ohřívačem vzduchu a popis ostatních částí kotle.

Druhá část je zaměřena na problematiku rosného bodu spalin, chemické reakce ve spalinách, možnosti ochrany proti nízkoteplotní korozi a popis měřicí sondy Lancom 200. Praktická část se zabývá metodikou měření rosného bodu spalin touto sondou, časovým harmonogramem měření a výsledky měření.

Třetí, výpočtová část se zabývá rozboru vybraných topných plynů, výpočtem složení spalin, spalovacími rovnicemi jednotlivých složek plynů a celkovým množstvím potřebného spalovacího vzduchu a vzniklých spalin při vybraném měření.

Klíčová slova: Rosný bod, ohřívač vzduchu, měření rosného bodu, nízkoteplotní koroze.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

JANUSZ, A. *Dew Point Measurement of Combustion Products: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2019, 50 p. Thesis head: doc. Dr. Ing Bohumír Čech.

This bachelor thesis deals with measuring the dew point on the boiler K1. The first part of the thesis describes the boiler K1, the description of the air heater, the temperature distribution in the space above the air heater and the description of the other parts of the boiler.

The second part is focused on the dew point, a chemical reaction in the flue gas, the possibility of protection against low-temperature corrosion and description of the measuring probe Lancom 200. Practical part concerns methodology measuring dew point this probe, the measurement time schedule and the measurement results.

The third, computational part, deals with analysis of selected rating gases, calculation of combustion gases composition, combustion equations of individual gas components, total amount of necessary combustion air and resulting flue gas during selected measurement.

Keywords: Dew point, air heater, dew point measurement, low temperature corrosion.

## Obsah

|   |    |
|---|----|
| Seznam použitých značek a symbolů .....                         | 10 |
| Úvod .....  | 12 |
| 1 Popis a parametry kotle K1 .....                              | 13 |
| 1.1 Základní popis .....  | 13 |
| 1.2 Buben kotle .....   | 14 |
| 1.3 Výparník kotle .....  | 14 |
| 1.4 Přehříváč páry .....  | 14 |
| 1.5 Přihříváč páry .....  | 14 |
| 1.6 Ekonomizér EKO 1 .....                                      | 14 |
| 1.7 Ekonomizér EKO 2 .....                                      | 15 |
| 1.8 Ohřívák vzduchu .....                                       | 15 |
| 1.9 Parametry kotle K1 .....                                    | 16 |
| 1.10 Schéma kotle K1 .....                                      | 17 |
| 1.11 Hořáky kotle .....   | 18 |
| 1.12 Ventilátory kotle K1 .....                                 | 19 |
| 1.13 Nános sirných sloučenin na trubkách výměníku LUVO .....    | 21 |
| 1.14 Rozložení teploty spalin v místě měření rosného bodu ..... | 22 |
| 1.15 Parametry plyných paliv spalovaných kotlem K1 .....        | 24 |
| 1.15.1 Parametry a složení vysokopecního plynu .....            | 24 |
| 1.15.2 Parametry a složení koksárenského plynu .....            | 25 |
| 1.15.3 Parametry a složení zemního plynu .....                  | 26 |
| 1.15.4 Parametry a složení konvertorového plynu .....           | 27 |
| 2 Měření rosného bodu .....                                     | 28 |
| 2.1 Rosný bod spalin .....                                      | 28 |
| 2.2 Charakteristika síry a oxidů síry .....                     | 29 |
| 2.3 Ochrana proti nízkoteplotní korozi .....                    | 30 |



|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.4 | Místo měření .....                            | 30 |
| 2.5 | Měřicí sonda Lancom 200 .....                 | 31 |
| 2.6 | Postup při měření .....                       | 33 |
| 2.7 | Režimy kotle při měření rosného bodu .....    | 33 |
| 2.8 | Průběh měření .....                           | 33 |
| 2.9 | Výsledky měření .....                         | 36 |
| 3   | Výpočty .....                                 | 37 |
| 3.1 | Plynná paliva.....                            | 37 |
| 3.2 | Spalování uhlovodíkového plynu .....          | 37 |
| 3.3 | Výpočet složek spalín z rozboru KP a VP ..... | 38 |
| 4   | Současný stav kotle K1 .....                  | 44 |
|     | Závěr .....                                   | 45 |
|     | Seznam použité literatury a zdrojů: .....     | 48 |
|     | Seznam obrázků .....                          | 49 |
|     | Seznam tabulek .....                          | 50 |

## Seznam použitých značek a symbolů

### Zkratky:

|      |                           |
|------|---------------------------|
| EKO  | Ohřívač napájecí vody     |
| LUVO | Ohřívač vzduchu           |
| KOP  | konventorový plyn         |
| KP   | koksárenský plyn          |
| PR   | přehřívač páry            |
| SV   | spalinový ventilátor      |
| VP   | vysokopecní plyn          |
| VT   | vysokotlaká přehřátá pára |
| ZP   | zemní plyn                |

### Značky:

|                    |   |             |
|--------------------|---|-------------|
| $m_p$              | množství páry                               | t/h         |
| $t$                | teplota                                     | °C          |
| $Q_r^i$            | výhřevnost                                  | MJ/ $Nm^3$  |
| $V_{m\acute{e}r.}$ | měrný objem na jednotku paliva              | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{O_2,t}$        | stechiometrické množství kyslíku            | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{vz,t}^s$       | měrné množství teoretického vzduchu suchého | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{vz}^s$         | měrné množství skutečného vzduchu suchého   | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{vz}$           | měrné množství skutečného vzduchu vlhkého   | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{CO_2}$         | měrné množství oxidu uhličitého             | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{N_2}$          | měrné množství dusíku                       | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{sp,t}^s$       | měrné množství teoretických suchých spalin  | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{sp}$           | měrné množství skutečných suchých spalin    | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{H_2O}$         | měrné množství vody ve spalinách            | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{vz}^c$         | celkové množství spalovacího vzduchu        | $Nm^3/Nm^3$ |
| $V_{sp}^c$         | celkové množství spalin                     | $Nm^3/Nm^3$ |

### Chemické značky:

|          |           |
|----------|-----------|
| $C_xH_y$ | uhlovodík |
| $C_2H_2$ | acetylen  |

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| $C_2H_4$    | etylen                  |
| $C_2H_6$    | etan                    |
| $C_3H_8$    | propan                  |
| $C_4H_{10}$ | butan                   |
| $CH_4$      | metan                   |
| $CO$        | oxid uhelnatý           |
| $CO_2$      | oxid uhličitý           |
| $H_2SO_4$   | kyselina sírová         |
| $H_2O$      | voda                    |
| $HCl$       | kyselina chlorovodíková |
| $NO_x$      | oxidy dusíku            |
| $SO_x$      | oxid síry               |
| $SO_2$      | oxid siřičitý           |
| $SO_3$      | oxid sírový             |

## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření rosného bodu spalin. Měření jsem provedl ve spolupráci s vedoucím bakalářské práce. Měření bylo provedeno na kotli K1, ve třetím tahu kotle, v budově teplárny E2, společnosti Energetika Třinec a.s. Důvodem měření je zanášení a zneprůchodnění asi jedné třetiny výměníků ohřívače spalovacího vzduchu ztvrdlými nánosy. Toto znečištění značně omezuje průchod vyššího objemu spalin 3. tahem kotle. Při objemu spalin nad zhruba  $70\,000\text{Nm}^3$  a parním výkonu kotle nad zhruba  $50\text{t/h}$  vzniká přetlak ve spalovací komoře, po určitém čase dochází k zapůsobení ochran kotle K1 a tím k jeho výpadkům. Ohřívač vzduchu byl na konci listopadu 2017 vyčištěn a zprůchodněn. V současné době proběhne oprava ohřívače.

Před realizací měření rosného bodu spalin, bylo na výstupu z ohřívače vzduchu měřeno rozložení teploty spalin ve spalinovém kanále. Toto měření proběhlo vícekrát při různých provozních stavech a složení paliv. Rozložení teplot bylo měřeno ve stejném místě, jako samotné měření rosného bodu.

Dne 21.12.2017 bylo provedeno ověřovací měření rosného bodu spalin na výstupu z kotle K1. Měření bylo provedeno pro ověření složek způsobujících zanesení ohřívače vzduchu. Zanesení bylo způsobeno velkým zchlazováním a následnou kondenzací některých plynných složek spalin na stěnách trubek výměníku na straně vstupu studeného spalovacího vzduchu do ohřívače. Pro měření byl použit měřicí přístroj společnosti Land Instruments International, sonda LANCOM 200.

Cílem bakalářské práce je zhodnocení měření rosného bodu spalin porovnání vypočtených a naměřených hodnot rosného bodu, zhodnocení a nastínění opatření, které by efektivně zamezilo tvorbě tvrdých nánosů na povrchu trubek ohřívače vzduchu.

V práci se budu zabývat popisem kotle, na kterém se měřilo, vlastnostmi plynných paliv, rozložením teplot v úrovni měření 3. tahu kotle, obecně problematikou měření rosného bodu spalin, popisem a metodikou měření sondou LANDCOM 200, která byla využita k měření. Uvedu výpočet složení spalin vysokopecního a koksárenského plynu, množství spalovacího vzduchu a spalin podle rozboru plynů z laboratoří TŽ. Stručně rozeberu současný způsob provozování a stav kotle K1.

## **1 Popis a parametry kotle K1**

Kotel K1 byl dodán v roce 2007 firmou IEG Istroenergo Group a.s., Levice, Slovensko. Výrobce a montážní organizace SES Tlmače a.s. Výrobní číslo kotle 2573.

### **1.1 Základní popis**

Parní kotel NK1 je jednobubnový spřirozenou cirkulací, samonosný, vodotrubný, podtlakový. Stěny kotle tvoří kompaktní celek, který je umístěn na betonovém základě. Spádové trubky ukotvené v betonovém základě podepírají kotlové těleso umístěné před přední stěnou kotle. Kotel je vybavený jedním spalínovým ventilátorem s regulačním věncem, sloužícím k udržení podtlaku ve spalínových cestách a k dopravě spalínů z kotle do komína. Kotel má jeden vzduchový ventilátor vybavený regulačním věncem. Dále kotel disponuje reciventilátorem, který pomocí reci spalínů, odebíraných za druhým tahem kotle, dopomáhá k udržení teploty přehřáté a přihřáté páry při snížených výkonech. Slouží také ke snižování emisí oxidů dusíku  $\text{NO}_x$  ve spalínách. [5]

Kotel má tři tahy. První tah, spalovací komora obdélníkového průřezu, je tvořený plynotěsnými membránovými stěnami, zároveň sloužícími jako výparník. Na přední stěně kotle jsou umístěny čtyři hořáky, určené pro spalování zemního plynu, vysokopevního plynu, koksárenského plynu a konvertorového plynu. Každý hořák má 4 přívody plynů. Žádané množství spalovacího vzduchu zajišťují regulační klapky hořáků. [5]

Druhý tah kotle tvořený membránovými stěnami má po směru proudění spalínů umístěné vodorovné hady přehříváče páry PR2, přihříváče páry, přehříváče PR1 a dvěma svazky ohříváče vody EKO 2. Regulace požadované teploty výstupní přehřáté páry se provádí vstříkem napájecí vody do přehřáté páry mezi přihříváč a přehříváč PR2. [5]

Ve třetím tahu, tvořeným plechovým kanálem jsou dva svazky ohříváče EKO 1 a trubkový ohříváč vzduchu LUVO. [5]

## **1.2 Buben kotle**

Buben kotle umístěný na podlaží +24m, má průměr 1600mm, je tvořen válcovou částí dlouhou 6m, ke které jsou přivařeny půlkruhové dna opatřena vstupními průlezy. Buben je vyroben z plechu materiálu třídy 13. Vnitřní vestavba a děrovaný odlučovací plech slouží pro dosažení potřebné čistoty páry v kotelním tělese. K dostatečnému pokrytí rychlých teplotních změn při časté a rychlé záměně paliv má buben vodní objem 12,2m<sup>3</sup>. [5]

## **1.3 Výparník kotle**

Všechny membránové stěny tvoří výparný systém kotle o vodním objemu 14,2m<sup>3</sup>. Celý tento systém je vytvořený válcovanými trubkami z oceli třídy 12 022. K výparníku patří také podpěry, bandáže a vedení. Výparník lze odvodnit přes odvodňovací baterii opatřenou uzavíracími a odvodňovacími armaturami. [5]

## **1.4 Přehřívač páry**

Přehřívač páry je čtyřstupňový o vodním objemu cca 2,3m<sup>3</sup>, tvořený hladkými trubkami z oceli třídy 15 a 17. Jeho součástí jsou vstupní a výstupní komory přehřívačů, závěsy, podpěry a výztuhy. [5]

## **1.5 Přihřívač páry**

Tvořený hladkými svazky trubek z oceli třídy 15 a 17. Součástí přihřívače jsou vstupní komory přihřívače, závěsy, podpěry a výztuhy. Vodní objem je cca 3,2m<sup>3</sup>. [5]

## **1.6 Ekonomizér EKO 1**

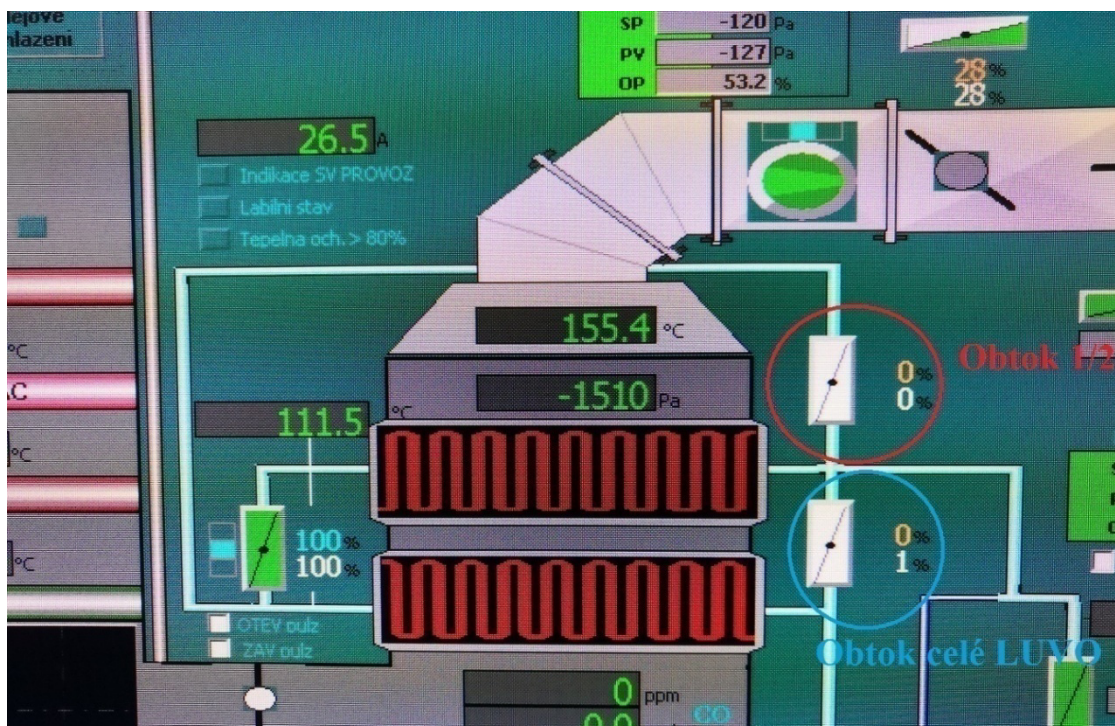
Ohřívač vody složený ze dvou hladkých svazků trubek z oceli třídy 12, umístěný v samostatném plechovém kanálu v 3. tahu kotle před ohřívačem vzduchu má vodní objem cca 6,5m<sup>3</sup>. [5]

## 1.7 Ekonomizér EKO 2

Ohříváč vody složený ze dvou hladkých svazků trubek z oceli třídy 12, umístěný v 3. tahu kotle před ohříváčem vzduchu má vodní objem cca 2,5m<sup>3</sup>. [5]

## 1.8 Ohřívák vzduchu

Ohříváč vzduchu je umístěný jako poslední teplosměnná plocha ve 3. tahu kotle. Ohříváč vzduchu je dvojdílný, vyrobený z hladkých trubek materiálu tř. 11. Patří sem také příslušné trubkovnice a podpěry. Zajišťuje požadované ohřátí spalovacího vzduchu a vychlazení spalin před kouřovým ventilátorem a komínem. Obtokové kanály vybavené příslušnými klapkami, nainstalované u ohříváče vzduchu slouží k odstavení jednotlivých dílů ohříváče. Těmito kanály se reguluje teplota spalin za účelem nepodkročení rosného bodu při provozu jakékoliv směsi plynů. Obtoky také slouží ke snižování emisí dusíku (NO<sub>x</sub>) a to snižováním teploty spalovacího vzduchu. Na následujícím obrázku jsou vyobrazeny obtokové klapky a LUVO. [5]



Obrázek 1.8.1 Obtoky ohříváku a ohřívák z obrazovky operátora, zdroj vlastní.

## 1.9 Parametry kotle K1

|   |                        |
|---|------------------------|
| Jmenovitý výkon VT páry                                 | 80 t/h                 |
| Minimální výkon VT páry při dodržení parametrů přehřátí | 28 t/h                 |
| Teplota přehřáté páry                                   | 495 °C ± 8°C           |
| Tlak přehřáté páry                                      | 12 MPa                 |
| Teplota napájecí vody                                   | 115 °C, omezeně 130 °C |

Výkon přehřáté páry max. 110 t/h \*

\* Uvedený průtok je maximální, minimální průtok je ekvivalentní min. regulačnímu výkonu VT páry kotle

|  |  |
|--|--|
| Teplota přehřáté páry                                  | 380°C  |
| Tlak přehřáté páry (absolutní)                         | 1,8 ÷ 2,2 MPa  |
| Teplota spalin před komínem-min. (různá skladba paliv) | 125,1 °C (chudý plyn)<br>113,4 °C (průměr. plyn)<br>118,4 °C (bohatý plyn) |

Maximální množství spalovaných plynů samostatně nebo ve směsi plynů (4 hořáky)

- vysokopecní plyn 80 000  $\text{Nm}^3/\text{hod}$
- konvertorový plyn 15 000  $\text{Nm}^3/\text{hod}$
- koksárenský plyn 12 500  $\text{Nm}^3/\text{hod}$
- zemní plyn 5 000  $\text{Nm}^3/\text{hod}$

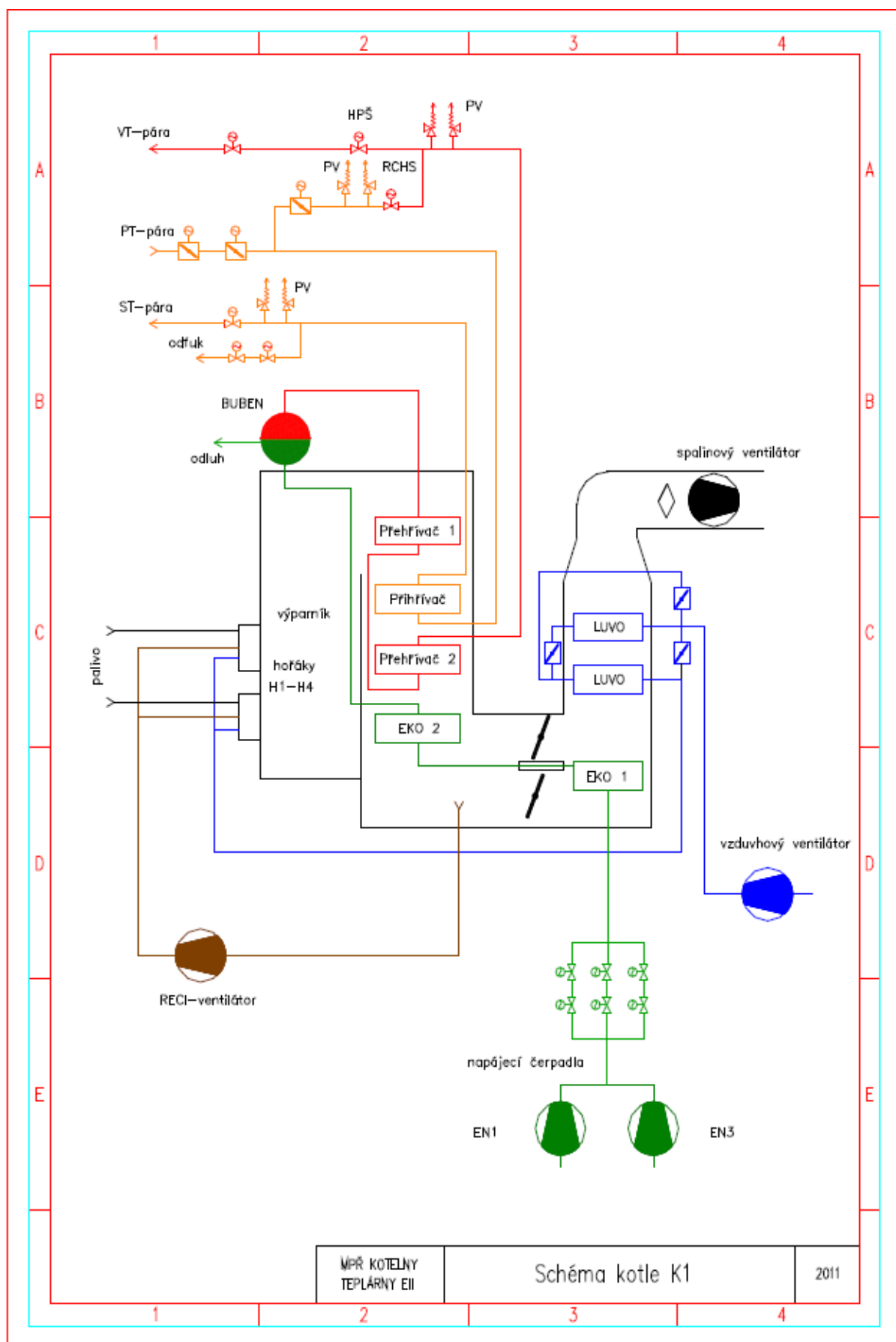
Minimální množství spalovaných plynů samostatně nebo ve směsi plynů (4 hořáky)

- vysokopecní plyn 26 800  $\text{Nm}^3/\text{hod}$
- konvertorový plyn 4000  $\text{Nm}^3/\text{hod}$
- koksárenský plyn 3 200  $\text{Nm}^3/\text{hod}$
- zemní plyn 840  $\text{Nm}^3/\text{hod}$

[5]



## 1.10 Schéma kotle K1



Obrázek 1.10.1 Schéma kotle K1, zdroj[5]

## 1.11 Hořáky kotle

Kotel K1 je vybaven 4 nízko emisními hořáky na hutní plyny a zemní plyn. Sestava hořáku je tvořená předspalovací komorou pro chudý plyn a vírovým hořákem SAACKE. Každý vírový hořák je osazen dvěma hlídači plamene, stabilizačním a zapalovacím hořákem.

Předspalovací komora se žáruvzdornou vyzdívkou je umístěna mezi vírovým hořákem a ohništěm slouží k tangenciálnímu vhánění vysokopecního plynu (VP), konvertorového plynu (KOP), koksárenského plynu (KP) a recispalin. Toto vhánění má za následek nadkritický vír vedoucí ke stabilnímu plamenu s velmi nízkou emisí  $\text{NO}_x$ . Každá předspalovací komora má tři hlídače plamene. Jeden je umístěn ve výhybu boční stěny a druhý je vodorovně 50 mm od výhybů přední membránové stěny (pod teploměrem teploty komory). Koksárenská vsuvka sloužící pro potřeby stabilizace vysokopecního plynu DN65 je umístěna do přechodového kusu na konci každé větve vysokopecního plynu, při vstupu do spalovací komory. [5]

### Vírový hořák SSBG 200 na kotli K1

Hořák je tvořen komorou spalovacího vzduchu, do které jsou zasunuty samostatné vsuvky pro koksárenský a zemní plyn. Hořák na koksárenský a zemní plyn je konstruován jako plynová vsuvka s hlavicemi zaústěnými v hubici hořáku. Zapalovací hořák se zabudovaným řídicím systémem spaluje zemní plyn, je vybaven ionizačním hlídačem plamene. Samostatné ventilátory přivádí spalovací vzduch pro zapalovací hořáky, společně s chladícím vzduchem jak pro chlazení pozorovacích kukátek, tak pro hlídače plamene. Hořáky jsou dále opatřeny pozorovacími kukátkami na kontrolu plamene za provozu a hlídači plamene. Hlídače jsou namontovány na trubku připevněnou k otočnému lůžku, které umožňuje přesné nastavení směru.[5]

Technické parametry:

- Výrobce hořáku SAACKE
- Typ hořáku SSBG 200
- Počet hořáků na jeden kotel 4
- Maximální výkon hořáku 20 MW
- Vysokopecní plyn (na hořák) 17,8 MW
- Koksárenský plyn (na hořák) 15 MW

- Konvertorový plyn (na hořák) 8 MW
- Zemní plyn (na hořák) 12,5 MW
- Napájecí el. zdroj 230 V / 50 Hz

## 1.12 Ventilátory kotle K1

### Vzduchový ventilátor

Vzduchový ventilátor slouží k dopravě spalovacího vzduchu nasávaného podle potřeby z prostoru kotelny v zimním období, nebo z venku v letním období. Požadovaný tlak vzduchu reguluje regulační věnec ventilátoru, množství vzduchu pro jednotlivé hořáky zajišťují regulační klapky, které jsou pro každý hořák zvlášť.

Vzduchový ventilátor je radiální, typ RVM 1600 hnaný elektromotorem o výkonu 365kW, 6000V/50Hz.

Technické parametry:

- počet kusů : 1
- teplota na vstupu 20°C
- průtok vzduchu 24,660 Nm<sup>3</sup>/s
- průtok vzduchu 26,466 m<sup>3</sup>/s efektivní stav
- zvýšení statického tlaku 8 366 Pa
- celkový tlak 10 261 Pa
- počet otáček 1 460 ot/min
- účinnost 83,12%

Vzduchový ventilátor se nachází na úrovni +0,000 m na levé straně kotle K1.[5]

### Spalinový ventilátor

Spalinový ventilátor slouží k udržení podtlaku v kotli a k dopravě spalin do komína. Podtlak reguluje pomocí regulačního věnce, který řídí výkon ventilátoru.

Spalinový ventilátor je axiální, typu ARK 1400 hnaný elektromotorem o výkonu 470kW, 6000V/50Hz.

Technické parametry:

- počet kusů : 1
- teplota na vstupu 120°C
- průtok spalin 45,7 Nm<sup>3</sup>/s
- průtok spalin 65,972 m<sup>3</sup>/s
- zvýšení statického tlaku 4029 Pa
- celkový tlak 4527 Pa
- počet otáček 1485 ot/min
- účinnost 80,7 %

Spalinový ventilátor se nachází na plošině 25,600 m u komína K1, K2.[5]

### **Recirkulační ventilátor**

Radiální recirkulační ventilátor slouží pro dosažení požadovaných parametrů přehřáté a přihřáté páry na výstupu z kotle zejména při snížených výkonech kotle. Slouží také pro snížení obsahu NO<sub>x</sub> ve spalinách při nedostatku vysokopecního plynu. U hořáků, kde společně hoří zemní a koksárenský plyn, regulační klapky přidávají ke spalovacímu vzduchu požadované množství recispalin. Ventilátor typu RVM 2000 je hnaný elektromotorem o výkonu 110kW, 400V/50Hz. Regulaci výkonu ventilátoru zabezpečuje primárně použití frekvenčního měniče, v případě poruchy FM lze ventilátor provozovat pomocí softstartéru.

Technické parametry:

- počet kusů : 1
- teplota na vstupu 250 °C
- průtok spalin 9,78 Nm<sup>3</sup>/s
- průtok spalin 19,401 m<sup>3</sup>/s
- zvýšení statického tlaku 3500 Pa
- celkový tlak 3769 Pa
- počet otáček 980 ot/min
- účinnost 83,3 %

Recirkulační ventilátor se nachází na pravé straně kotle na úrovni +0,000 m.[5]

### 1.13 Nános sirných sloučenin na trubkách výměníku LUVO



*Obrázek 1.13.1 Zanesení trubek výměníku zdroj: vlastní*



*Obrázek 1.13.2 Zanesení LUVA po otevření vlezu v prostoru mezi LUVY, zdroj: ET.a.s.*

## 1.14 Rozložení teploty spalin v místě měření rosného bodu

V období od 30.11.2017 do 28.12.2017 jsem nepravidelně měřil rozložení teploty spalin na kotli K1 při různých provozních stavech a složení plynů. Místo měření bylo stejné, jako to, kde proběhlo měření rosného bodu spalin viz. kapitola 2. K měření byl použitý pravidelně kalibrovaný referenční teploměr **OMEGA HHM25-TC**. Čidlo teploměru bylo umístěno na konci kovové trubky o délce cca 3m.

Naměření všech teplot trvalo zhruba půl hodiny. Rozměry spalinového kanálu jsou v místě měření zhruba 3350 x 2300 mm. Je tam zhotoveno celkem 8 otvorů se šrouby. 4 otvory jsou umístěny z levé strany o rozměru 1 ¼'' vnitřní závit a 4 otvory na zadní straně o rozměrech M36 vnitřní závit. Z tohoto počtu jsou 2 otvory obsazeny stávajícím měřením teploty (na obrázku 1.14.1 označeno jako SV) a tlaku před sáním spalinového ventilátoru. Měřicí místa jsou zakresleny v obrázku 1.14.1. Při měření se odšrouboval šroub a do spalinového kanálu byla zavedena tyč s čidlem teploměru na konci. Na tyči byly odměřeny úseky po 50cm, po zastavení a odečtení teploty na displeji teploměru se tyč posunula o dalších 50cm hlouběji do spalinového kanálu. Postupně se tak změřily teploty v celkem 27 místech.

V následujícím obrázku jsou uvedeny teploty v měřených bodech spalinového kanálu. Protože rozložení teplot při různých provozních stavech bylo ve všech měřeních téměř stejné a rozdíly v rozích měřené plochy byly značné, uvedu zde pouze jedno měření a to ze dne 10.12.2017 v čase 9:25-9:52h. V tuto dobu byl nejvyšší rozdíl teplot. Naměřené teploty jsou ve°C.

Parametry kotle a složení plynu v době měření:

t nasávaného spal. vzduchu- 36°C

t sání spalinového vent.- 148-156°C

m<sub>p</sub> VT páry- 64t/h

poloha klapky obtok LUV0- 0%

Průtok VP plynu- 42000<sub>N</sub>m<sup>3</sup>/h

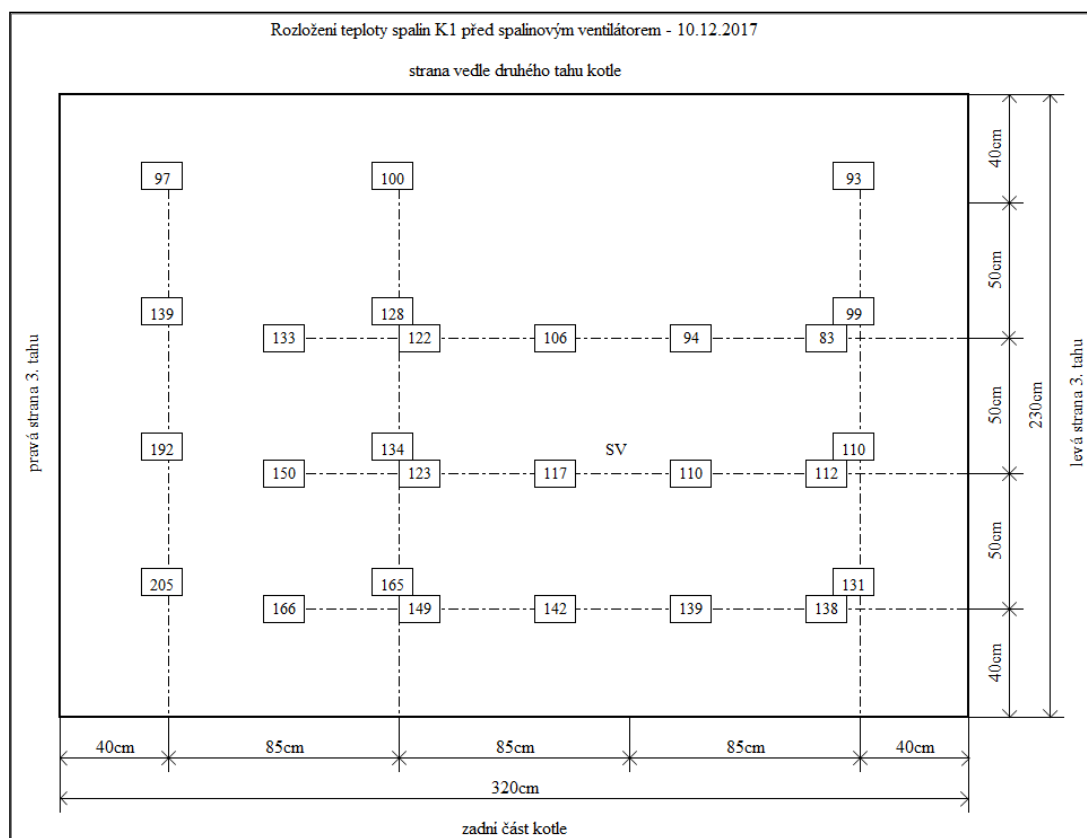
poloha klapky ½ LUV0 0%

Průtok KP- 5000<sub>N</sub>m<sup>3</sup>/h

poloha klapky 2/2 LUV0 100%

Bez ZP

poloha klapky obtoku EKO 0-4%



*Obrázek 1.14.1 Rozložení teplot na sání SV [°C], zdroj: vlastní*

V obrázku jsou patrné chyby měření způsobené dlouhou dobou měření a změnami parametrů výstupních spalin v průběhu měření. Nicméně rozdíly teplot jsou i z těchto měření velké a strana vstupu ohřívaného spalovacího vzduchu do LUVU (strana vedle druhého tahu kotle) je výrazně podchlazována a na této straně se tvoří největší nánosy sirných sloučenin. Dále z tohoto kolísání teplot v krátkém časovém úseku je vidět, že dochází k občasnému krátkému podkračování rosného bodu, přičemž u následného překročení rosného bodu vzniklý zkondenzovaný nános vypaří  $H_2O$  a sirnatá směs zaschne na povrchu trubek LUVU. V místě označeném jako SV je umístěno provozní měření teploty, které je dálkově přenášeno na monitor operátora kotle a zobrazuje zhruba střední hodnotu teploty.

Při měření dne 28.12.2017 byly měřeny teploty ve spalínovém kanále při složení paliv. Průtok VP-0  $Nm^3/h$ ; Průtok KP- 6800 $Nm^3/h$ ; Průtok ZP- 1190 $Nm^3/h$ ;  $t$  sání SV 150°C; poloha obtoku EKO1- 62%; Průtok VT páry 40-45t/h byly teploty v měřených místech menší zhruba o 5°C. Tento teplotní rozdíl není velký, ale vzhledem ke složení koksárenského a zemního plynu (vysoký podíl vodíku) je rosný bod spalin položen níž, než při směsi spalin z vysokopecního plynu.

## 1.15 Parametry plyných paliv spalovaných kotlem K1

Kotel K1 je uzpůsoben pro spalování čtyř druhů plyných paliv. Tři jsou hutní plyny a to plyn vysokopecní, koksárenský a konvertorový, dále při nedostatku hutních plynů může spalovat také plyn zemní. V největší míře je spalován vysokopecní plyn. Druhým nejvíce používaným plynem je koksárenský plyn. Zemní plyn se využívá při nedostatku hutních plynů, zejména vysokopecního a to buď k dodržení minimálního výkonu kotle, k dodržení požadavku strojovny na parní výkon nebo jako stabilizace ke koksárenskému a konvertorovému plynu, které nemůžou hořet samostatně. Konvertorový plyn se zapaluje pouze ve výjimečných případech, protože slouží k obohacení směsného plynu pro ostatní kotle na teplárně E2.

### 1.15.1 Parametry a složení vysokopecního plynu

- Výhřevnost: 2,5 – 3,8 MJ/Nm<sup>3</sup>
- Oxid uhelnatý CO = 23,7%
- Vodík H<sub>2</sub> = 3,2%
- Oxid uhličitý CO<sub>2</sub> = 16%
- Dusík N<sub>2</sub> = 57,1%
- $Q_{\min}^i = 3,1 \text{ MJ/m}^3$
- Tlak plynu na vstupu do budovy E2: 2,5 – 3,5 kPa
- Teplota: do 35 °C
- Spodní mez výbušnosti: 26%
- Horní mez výbušnosti: 87%
- Hustota (20°C): 1,25 kg/m<sup>3</sup>
- Teplota vznícení: 650 °C

Vysokopecní plyn vzniká při výrobě surového železa, jako vedlejší produkt ve vysokých pecích nedokonalým spalováním koksu, uhelného prášku a uvolněním oxidu uhličitýho z vápence, který je součástí vsázky. V pecích, využívajících i práškové uhlí jako palivo, výsledný plyn obsahuje částičky uhlíku a popílku, které zanášejí rozvody a zařízení na další využití plynu. Vysokopecní plyn je jedovatý, bezbarvý a nebezpečný pro člověka



tím, že obsahuje CO a má hustotu podobnou jako vzduch. Kotel K1 spaluje vysokopecní plyn v nejvyšším objemu a to z důvodu přebytku plynu při současném provozu vysokých pecí 4 a 6. Množství plynu pro hořáky může být až  $80000\text{m}^3/\text{h}$ . Minimální množství je  $6700\text{m}^3/\text{h}$  a to při provozu pouze jednoho hořáku VP. Minimální teplota ústí hořáku, při které se může zapálit VP je  $600^\circ\text{C}$ . Minimální teplota spalovacího vzduchu pro zapálení je  $135^\circ\text{C}$ . [5], [6]

### 1.15.2 Parametry a složení koksárenského plynu

- Výhřevnost:  $16,3 - 17,7\text{MJ}/\text{m}^3$
- Vodík  $\text{H}_2 = 55\%$
- Metan  $\text{CH}_4 = 24\%$
- Dusík  $\text{N}_2 = 8\%$
- Oxid uhelnatý  $\text{CO} = 7\%$
- Oxid uhličitý  $\text{CO}_2 = 3\%$
- $\text{C}_\text{N}\text{H}_\text{M} = 3\%$
- $Q_{\text{min}}^i = 16,5\text{ MJ}/\text{m}^3$
- Tlak na plynu na vstupu do budovy E2:  $3,8 - 5,0\text{ kPa}$
- Teplota: do  $35^\circ\text{C}$
- Spodní mez výbušnosti:  $4\%$
- Horní mez výbušnosti:  $35\%$
- Hustota ( $20^\circ\text{C}$ ):  $0,55\text{ kg}/\text{m}^3$
- Bod vznícení:  $560^\circ\text{C}$

Výrobou koksu v koksárenských pecích vzniká koksárenský plyn. Hlavní složka plynu je vodík. V závislosti na druhu a kvalitě použitého černého uhlí se podíl vodíku a ostatních složek mění. Na výstupu z koksárenských baterií je plyn silně znečištěn, proto je nutné ho vyčistit a odsířit. Koksárenský plyn je jedovatý, nebezpečný nízkou mezí výbušnosti a hlavním podílem vodíku, který má velkou rychlost hoření. Hrozí nebezpečí výbuchu i při malém úniku plynu. Množství spalovaného koksárenského plynu je závislé na tlaku koksového plynu při vstupu do směsné stanice Teplárny E2. Regulace je při běžném

provozu kotle v tlakovém režimu. Topič může korigovat množství spalovaného plynu změnou horní a dolní meze. Minimální množství plynu do jednoho hořáku je  $800 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . [5], [6]

### 1.15.3 Parametry a složení zemního plynu

- Výhřevnost:  $35,7 \text{ MJ/Nm}^3$
- Metan  $\text{CH}_4 = 98\%$
- Ethan  $\text{C}_2 \text{H}_6 = 0,7\%$
- Propan  $\text{C}_3 \text{H}_8 = 0,2\%$
- Oxid uhličitý  $\text{CO}_2 = 0,2\%$
- Dusík  $\text{N}_2 = 0,9\%$
- $Q_{\text{rmin}}^i = 35,00 \text{ MJ/Nm}^3$
- Tlak:  $50 \text{ kPa}$
- Teplota: do  $25^\circ\text{C}$
- Spodní mez výbušnosti:  $5,3\%$
- Horní mez výbušnosti:  $15\%$
- Hustota ( $20^\circ\text{C}$ ):  $0,717 \text{ kg/m}^3$
- Bod vznícení:  $536^\circ\text{C}$

Zemní plyn je nejrozšířenějším fosilním plynným palivem. Obvykle se vyskytuje společně v ložisku s ropou, uhlím, nebo samostatně. Metan tvoří hlavní složku zemního plynu. Jeho koncentrace bývá  $85\text{--}98\%$ , záleží na konkrétním ložisku. Zemní plyn se využívá při nedostatku hutních plynů, zejména vysokopecního a to buď k dodržení minimálního výkonu kotle, k dodržení požadavku stroje na parní výkon nebo jako stabilizace ke koksárenskému a konvertorovému plynu, které nemůžou hořet samostatně. Zemní plyn se také využívá jako první palivo při nájedzu kotle a k nahřívání ústí hořáků při startech, kdy je hořák úplně vyhašený [5]

#### 1.15.4 Parametry a složení konvertorového plynu

- Výhřevnost:  $7,2 - 8,5 \text{ MJ/Nm}^3$
- Vodík  $\text{H}_2 = 1,5\%$
- Kyslík  $\text{O}_2 = 0,5\%$
- Dusík  $\text{N}_2 = 18\%$
- Oxid uhelnatý  $\text{CO} = 62\%$
- Oxid uhličitý  $\text{CO}_2 = 18\%$
- $Q_{\text{rmin}}^i = 7,8 \text{ MJ/m}^3$
- Tlakna vstupu do budovy E2:  $3,5 - 8 \text{ kPa}$
- Teplota: do  $35^\circ\text{C}$
- Spodní mez výbušnosti:  $16\%$
- Horní mez výbušnosti:  $77\%$
- Hustota:  $1,36 \text{ kg/m}^3$
- Bod vznícení:  $630^\circ\text{C}$

Konvertorový plyn vzniká jako vedlejší produkt při výrobě oceli v kyslíkové konvertorové ocelárně. Hlavní složkou je oxid uhelnatý. Tento plyn je nejedovatější a pro zaměstnance nejnebezpečnější z hutních plynů v TŽ. Je nebezpečný tím, že je těžší než vzduch a při úniku okamžitě klesne k zemi. K otravě stačí i malý únik. Minimální množství plynu na hořák je  $1000_{\text{Nm}^3/\text{h}}$ . [5]

## 2 Měření rosného bodu

Měření provádělo centrum ENET- Akreditované pracoviště pro diagnostiku a provoz tepelně- energetických zařízení. Měření prováděl pan doc. Dr. Ing. Bohumír Čech a pan Ing. Zbyszek Szeliga Ph.D., já jsem byl po dobu měření přítomen a nápomocen.

### 2.1 Rosný bod spalin

Rosný bod spalin je obvykle chápán jako teplota, při které dochází ke stavu nasycení par ve spalinách a začínají kondenzovat na povrchu výhřevných ploch, kouřovodů, nebo stěn tahů kotle. Pokud palivo neobsahuje síru, dochází ke kondenzaci vodní páry. [1]

Při spalování paliv obsahujících síru, dochází jejich oxidováním ke vzniku  $\text{SO}_2$ .  $\text{SO}_3$  se začíná tvořit v závislosti na množství přebytku spalovacího vzduchu, až při ochlazování spalin pod  $600^\circ\text{C}$ . Z vodních par a  $\text{SO}_3$  vzniká při teplotách spalin pod  $200^\circ\text{C}$  plynná  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Při dalším zchlazení spalin vodní pára a plynná  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kondenzují a vytvoří roztok  $\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Vzniklá směs způsobuje korozi všech částí s teplotou povrchu nižší, než je rosný bod směsi. Tato směs kondenzuje rychleji, protože síra má teplotu sytosti vyšší než vodní pára. Teplota rosného bodu závisí kromě obsahu síry v palivu i na parciálním tlaku vodní páry a na hodnotě součinitele přebytku vzduchu. Teplotu rosného bodu také zvyšuje přítomnost jemných tuhých částic ve spalinách, které fungují jako kondenzační jádra. [3],[4]

Spalováním prakticky jakéhokoli paliva vznikne ve spalinách určitý podíl vlhkosti. Voda přichází do spalovacího procesu obsažená ve spalovacím vzduchu, i samotné palivo obsahuje malý podíl zbytkové vlhkosti a při spalování jakékoli organické sloučeniny je voda jedním z produktů reakce. Za určitých podmínek může docházet ke kondenzaci vody, nebo různých vodních roztoků, čehož může být využito ke zvýšení tepelné účinnosti zařízení využitím entalpie fázové přeměny například u kondenzačních plynových kotlů.[10]

Obvykle však bývá kondenzace nežádoucím vlivem vzhledem k poškození kovových materiálů v kotli, nebo cihel komína. V závislosti na složení paliva, mohou spolu s vodou kondenzovat i další složky obsažené ve spalinách. Například roztoky anorganických kyselin

( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ) časté sou i organické kyseliny. Korozní poškození způsobené těmito kyselinami bývá pochopitelně značné.[10]

Ke kondenzaci dochází zejména na studeném povrchu výhřevných ploch nebo kanálů, které pak trpí tzv. nízkoteplotní korozi. Častými problematickými místy jsou stěny kouřovodů, ohřívače vzduchu v kotli, oběžná kola spalinových ventilátorů atd. Aby se korozi předešlo, musí být teplota povrchu vyšší, než rosný bod spalin. Koroze při mírném podkročení rosného bodu není příliš intenzivní. Při vyšším podkročení rosného bodu je však intenzita koroze mnohem vyšší. Problém kondenzace spalin na stěnách celku kotle lze vyřešit zvýšením povrchové teploty postižených míst nad rosný bod spalin. Koroze může náhle vzniknout i na dříve bezproblémovém zařízení například změnou složení paliv, či změnou provozních parametrů. Toto se stalo na kotli K1 po spuštění spalování koksárenského plynu.[1], [10]

## 2.2 Charakteristika síry a oxidů síry

Skupinu oxidů síry ( $\text{SO}_x$ ) tvoří oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ) a oxid sírový ( $\text{SO}_3$ ). Oxid siřičitý je bezbarvý nehořlavý, štiplavý, velice reaktivní ve vodě rozpustný plyn s bodem tání  $-72,7^\circ\text{C}$ , varu dosahuje při teplotě  $-10,2^\circ\text{C}$ . Tento prvek má v plynném stavu hustotu  $2,926\text{kg/m}^3$ . Rozpustnost oxidu siřičitého závisí hlavně na teplotě. Při teplotě  $20^\circ\text{C}$  činí  $113\text{g/l}$ , při  $0^\circ\text{C}$  už je to  $228\text{g/l}$ , což je podstatný rozdíl vzhledem k relativně malému rozdílu teplot. Oxid siřičitý je rozpustný ve vodě, kde se rozpustnost zvyšuje s rostoucím parciálním tlakem.  $\text{SO}_2$  je také rozpustný v kyselině sírové a v organických rozpouštědlech. [7], [13]

Oxid sírový vzniká jako meziprodukt při výrobě kyseliny sírové. Jde o kapalnou nebo tuhou látku dobře rozpustnou ve vodě, což má za následek vznik kyseliny sírové. Oxid sírový je bezbarvý plyn, těžší než vzduch, s hustotou v tuhé fázi  $1,995\text{kg/m}^3$  a bodem tání  $62,3^\circ\text{C}$ . V kapalně fázi  $1,920\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a bodem tání  $16,8^\circ\text{C}$ . Bod varu je  $44,8^\circ\text{C}$ . [8],[13]

Oxidy síry jsou látky velmi významně znečišťující ovzduší. Oxid siřičitý má na procesu znečišťování ovzduší větší podíl než oxid sírový, protože koncentrace  $\text{SO}_2$  v ovzduší je větší. Další sloučeniny síry, dostávající se do ovzduší jsou emise sulfanu ( $\text{H}_2\text{S}$ ), sirouhlík ( $\text{CS}_2$ ), a merkaptany.[7]

Dle Agentury Spojených států na ochranu životního prostředí (EPA), je v současné době největším problémem oxid siřičitý a je považován za základní ukazatel pro skupinu plyných oxidů. Koncentrace oxidu sírového v atmosféře je mnohem nižší než koncentrace oxidu siřičitého. Vysoké emise oxidu siřičitého mají za následek vznik dalších oxidů síry v atmosféře. [14]

## **2.3 Ochrana proti nízkoteplotní korozi**

Nejlepší ochranou proti nízkoteplotní korozi je udržení teploty stěny studeného konce ohříváku vzduchu (v místě vstupu studeného vzduchu) nad hodnotou teploty rosného bodu spalin. Toho lze dosáhnout přehřevem studeného vzduchu, který může být proveden přidaným parním ohříváčem, nebo recirkulací části horkého vzduchu. Cílem těchto úprav je zvýšit teplotu vzduchu před vstupem do spalínového ohříváče tak, aby teplota stěny ohříváče dostala nad rosný bod spalin. [1]

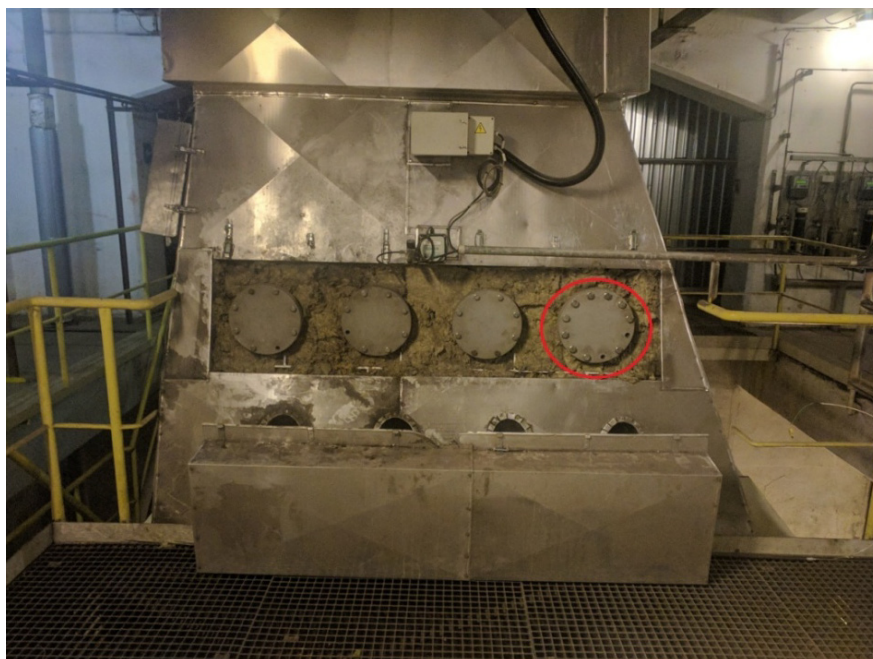
Přehřev parou v parním ohříváku se může zrealizovat parou 3ATA z odběru turbín kompresorů TK1, TK2, nízkotlaké části generátoru TG2, nebo z protitlaku napájecích čerpadel TN1, TN2, NTN1. Teplo přivedené do spalovacího vzduchu by v tomto případě muselo být započítáno do celkové tepelné bilance kotle. Tím by se pochopitelně mírně snížila jeho účinnost. [1], [9]

Dalším zmiňovaným způsobem ochrany proti nízkoteplotní korozi je recirkulace ohřátého výstupního vzduchu do nasávaného. Část ohřátého vzduchu se odebere za ohříváčem vzduchu a přidá se ke studenému spalovacímu vzduchu před ohříváčem, smíšením dojde ke zvýšení teploty vstupujícího vzduchu. Toto řešení by nejspíš vyžadovalo instalaci recirkulačního ventilátoru pro spalovací vzduch. [1]

## **2.4 Místo měření**

Měření rosného bodu a složení spalin bylo provedeno ve 3. Tahu kotle, ve výškové úrovni + 21m před sáním spalínového ventilátoru kotle K1, v rovině určené pro provozní měření teploty spalin, tlaku v kouřovodu a kalibraci prachoměru za uvedeným kotlem. Složení spalin bylo měřeno kontinuálně provozními měřicími přístroji. Pro měření byl využit měřicí otvor s přírubou o průměru  $\phi$  200 mm na levé straně 3. tahu v přední části

spalinového kanálu ve vzdálenosti cca 1,2 metrů od vnitřní stěny spalínového kanálu. Zkoušky měření rosného bodu spalin byly vždy zahájeny zasunutím sondy měření rosného bodu Lancom 200 do kouřovodu. Po zasunutí sondy probíhal proces nahřívání čidla na teplotu spalin, poté následovala fáze ochlazování a v okamžiku dosažení rosného bodu spalin na čidle byl proveden záznam hodnot.



*Obrázek 2.4.1 Místo měření zdroj: vlastní*

## **2.5 Měřicí sonda Lancom 200**

Sonda Lancom 200 se skládá ze sondy snímače vodivosti a teploty, které jsou namontované ve špičce, přenosné ovládací jednotky, která obsahuje regulátor průtoku vzduchu a elektroniky pro měření vodivosti, a teploty termočlánu. Těleso sondy dlouhé 1,5m je vyrobeno z nerezové oceli. Možnost protokolování a tisk dat umožňují postupné měření a následné analýzy. Snímač se skládá ze dvou platinových elektrod, zatavených v borokřemičitém (pyrex) skle. Platinové elektrody a sklo jsou ochlazovány tlakovým vzduchem, přivedeným z rozvodu technologického tlakového vzduchu. Při ochlazování povrchu skla tlakovým vzduchem začne kyselina sírová na straně spalin kondenzovat a tím se povrch skla stane vodivým. Naměřená vodivost se přenese na displej přenosné ovládací jednotky. V bodě, kdy je rychlost kondenzace na skle rovná rychlosti odpařování, kyselý

film se ustálí a vodivost je konstantní. Rovnovážný bod odpovídá teplotě rosného bodu kyseliny.[12]



*Obrázek 2.5.1 Sonda Landcom 200 – sonda zdroj:[9]*



*Obrázek 2.5.2 Sonda Landcom 200. Čidlo - detektor rosného bodu sondy s platinovými elektrodami (kruhová elektroda obklopující plochou elektrodu) zdroj[9],[12]*



*Obrázek 2.5.3 Zobrazovací jednotka sondy Landcom 200 zdroj[9]*



## 2.6 Postup při měření

Měřicí část sondy se umísťuje do proudu spalin ve spalinovém kanálu. Měření je zahájeno zavedením sondy do kouřovodu a temperováním čidla na teplotu blízkou teplotě spalin. Řízeným snižováním teploty čidla se v určitém okamžiku dosáhne teploty rosného bodu. Při měření musíme počítat s vlivem tuhých částic, které se mohou přichytit na plochu čidla a tím mohou značně ovlivnit možnost realizace měření. Po dosažení teploty rosného bodu je pak snížena intenzita chlazení čidla, čímž se opětovně zvýší teplota na čidle a odpaří se kondenzované složky. Po změření je sonda vyjmuta ze spalinového kanálu a čidlo důkladně očištěno od případných nánosů a kondenzovaných složek.[9]

## 2.7 Režimy kotle při měření rosného bodu

V poptávce společnosti Energetika Třinec a.s. byly uvedeny provozní stavy, při kterých mělo být provedeno měření. Tabulka č. 2.7.1 obsahuje informace o jednotlivých měřeních.

Tabulka 2.7.1 Označení jednotlivých zkoušek zdroj: [9]

| Číslování jednotlivých zkoušek | Plánovaná korekce O <sub>2</sub> | Plánované množství VPP<br>[ tis. m <sup>3</sup> /h ] | Plánované množství KP<br>[ tis. m <sup>3</sup> /h ] | Plánované množství ZP<br>[ tis. m <sup>3</sup> /h ] | Skutečné množství vyrobené páry<br>[ t/h ] |
|--------------------------------|----------------------------------|--|---|---|--|
| Zkouška č. 1                   |                                  | -  | 9   | 1   | 52,5                                       |
| Zkouška č. 2.a                 | -1,5                             | -  | 4   | 2   | 44   |
| Zkouška č. 2.b                 | 0,5                              | -  | 4   | 2   | 43,3                                       |
| Zkouška č. 3                   |                                  | 15   | 9   | 0,5   | 60,7                                       |
| Zkouška č. 4                   |                                  | 30   | 9   | -   | 71,9                                       |
| Zkouška č. 5.a                 | -0,3                             | 30   | 4   | -   | 45,9                                       |
| Zkouška č. 5.b                 | 0,5                              | 30   | 4   | -   | 48,9                                       |
| Zkouška č. 6                   |                                  | 50   | 4   | -   | 64,9                                       |

## 2.8 Průběh měření

Dne 21.12.2017 proběhlo měření.

9:30 Příjezd pracovníku VŠB-TU do areálu Teplárny E2, v Třineckých železárnách. Vstupní technické jednání. Prohlídka měřicích míst. Zahájení instalace měření.

11:00 Ukončení instalace měřicí techniky.

11:10 Zahájení Zkoušky č. 4., množství O<sub>2</sub> 4,2%

11:37 Snímky obrazovek operátora

11:40 Ukončení Zkoušky č. 4

11:50 Zahájení Zkoušky č. 5a. Korekce kyslíkusnížena na -0,3 množství O<sub>2</sub> 4,5%

11:57 Snímky obrazovek operátora

12:00 Ukončení Zkoušky č. 5a

12:10 Zahájení Zkoušky č. 5b. Korekce kyslíku zvýšena na +0,5, množství O<sub>2</sub> 5,3%

12:15 Snímky obrazovek operátora

12:20 Ukončení Zkoušky č. 5b

12:30 Zahájení zkoušky č. 6, množství O<sub>2</sub> 3,9%

12:40 Snímky obrazovek operátora

12:45 Ukončení zkoušky č. 6

13:05 Zahájení Zkoušky č. 3., množství O<sub>2</sub> 4,9%

13:08 Snímky obrazovek operátora

13:10 Ukončení Zkoušky č. 3

13:25 Zahájení Zkoušky č. 1., množství O<sub>2</sub> 4,1%

13:28 Snímky obrazovek operátora

13:30 Ukončení Zkoušky č. 1

13:45 Zahájení Zkoušky č. 2a. Korekce kyslíkusnížena na -1,5, množství O<sub>2</sub> 3,6%

13:54 Snímky obrazovek operátora

13:55 Ukončení Zkoušky č. 2a

|       |  |
|-------|--|
| 14:00 | Zahájení Zkoušky č. 2b. Korekce kyslíku zvýšena na +0,5, množství $O_2$ 5,7% |
| 14:08 | Snímky obrazovek operátora   |
| 14:10 | Ukončení Zkoušky č. 2b   |
| 14:20 | Ukončeno měření rosného bodu spalin.   |
| 14:55 | Ukončení měření, odjezd pracovníků VŠB-TU z areálu Třineckých železáren.[9]  |

Z důvodu urychlení přípravy požadovaných provozních stavů kotle, bylo měření prováděno od bodu č. 4. Všechny hořáky koksárenského plynu byly při měřeních v provozu.

Při měřeních č. 4, 5a, 5b, 6 byly v provozu všechny hořáky vysokopecního plynu, zároveň se měnilo množství koksárenského plynu a to mezi zkouškami 4 a 5a,b z  $9000_{Nm^3/h}$  na  $4000_{Nm^3/h}$ . Mezi zkouškami č. 5b a 6 operátor změnil množství vysokopecního plynu ze  $30000_{Nm^3/h}$  na  $50000_{Nm^3/h}$ .

Při přípravě měření č. 3 operátor postupně vyhasil hořáky č. 3 a č. 4 vysokopecního plynu a nahradil je plynem zemním (dohromady  $500_{Nm^3/h}$ ). Množství koksárenského plynu bylo zvýšeno na  $9000_{Nm^3/h}$ . V časovém harmonogramu je vidět, že příprava měření č. 3 byla časově nejnáročnější. To i přesto, že parní výkon kotle byl podobný, protože se vyměnil velký příkon a objem paliv.

Pro zkoušky č. 1, 2.a,b byly vyhašeny i zbývající hořáky vysokopecního plynu a nahrazeny plynem zemním. Množství koksárenského plynu bylo na zkoušku č. 1 ponecháno z předchozího měření a na zkoušky 2.a,b bylo sníženo na  $4000_{Nm^3/h}$ . Množství zemního plynu bylo pro měření č.1 na minimálním množství  $1000_{Nm^3/h}$ , při zkouškách 2.a,b zvýšeno na  $2000_{Nm^3/h}$ .

## 2.9 Výsledky měření

V následující tabulce jsou vypsány výsledky měření rosného bodu spalin v pořadí, v jakém bylo provedeno měření.

*Tabulka 2.9.1 Výsledky měření rosného bodu spalin [9]*

|  |      | zkouška č. 4 | zkouška č. 5a | zkouška č. 5b | zkouška č. 6  |
|--|------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| čas měření   | hod  | 11:10-11:40  | 11:50-11:55   | 12:10-12:20   | 12:30-12:45   |
| teplota spalin v místě měření                        | [°C] | 95           | 92            | 91            | 111           |
| rosný bod měřený sondou LAND                         | [°C] | 46           | 37            | 41            | <28           |
| výpočtový obsah vody ve spalinách, vzdušnině         | [%]  | 0,07327      | 0,04798       | 0,04753       | 0,03941       |
| Teplota sytosti vodních par ve spalinách (výpočtová) | [°C] | 47           | 39,64         | 39,47         | 36,24         |
|  |      | zkouška č. 3 | zkouška č. 1  | zkouška č. 2a | zkouška č. 2b |
| čas měření   | hod  | 13:05-13:10  | 13:25-13:30   | 13:45-13:55   | 14:00-14:10   |
| teplota spalin v místě měření                        | [°C] | 84           | 74            | 66            | 66            |
| rosný bod měřený sondou LAND                         | [°C] | 53,5         | 55            | 53            | 49,5          |
| výpočtový obsah vody ve spalinách, vzdušnině         | [%]  | 0,09288      | 0,1476        | 0,1383        | 0,1195        |
| Teplota sytosti vodních par ve spalinách (výpočtová) | [°C] | 51,25        | 59,4          | 58,27         | 55,71         |

Při měření rosného bodu byla společně s rosným bodem měřena také teplota spalin v místě čidla sondy. Provozní měření přenášené na obrazovku operátora měřilo vždy o zhruba 30 až 40°C více.

### 3 Výpočty

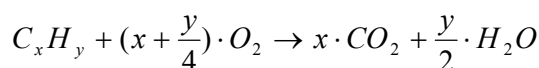
#### 3.1 Plynná paliva

Plynná paliva obsahují směs plynů, přičemž část z nich je spalitelná a zbytek inertní. Složení plynu se neudává jako hořlavina a balast, ale uvádí se výčtem všech obsažených plynů. Jednotka je  $1 \text{ Nm}^3$  ( $\text{Nm}^3$ - normální metr krychlový při  $T_N = 273\text{K}$ ,  $p_N = 101,325\text{kPa}$ ). Jednotlivé složky jsou uváděny jako koncentrace nebo procenta v původním vlhkém plynu. Hořlavé složky představují například vodík  $\text{H}_2$ , oxid uhelnatý  $\text{CO}$ , metan  $\text{CH}_4$  a různé další uhlovodíky označené  $\text{C}_x\text{H}_y$ , nehořlavými složkami mohou být oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , dusík  $\text{N}_2$ , kyslík  $\text{O}_2$ , argon  $\text{Ar}$ , oxid siřičitý  $\text{SO}_2$ , vodní pára atd. Pro zadání plynu musí platit.[1]

$$O_{\text{H}_2} + O_{\text{CO}} + \sum C_x H_y + O_{\text{CO}_2} + O_{\text{N}_2} + O_{\text{O}_2} + O_{\text{SO}_2} + O_{\text{H}_2\text{O}} + \dots = 1 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

#### 3.2 Spalování uhlovodíkového plynu

Typickým příkladem plynného paliva je vodík, oxid uhelnatý, nebo uhlovodíková paliva (metan, acetylén, propan atd.). Abychom byli schopni sestavit spalovací rovnici libovolného uhlovodíku  $\text{C}_x\text{H}_y$ , můžeme použít rovnici pro přepočet, do které jednoduše dosadíme. [11]



Tabulka 3.2.1 Spalovací rovnice metanu, zdroj [11]

| Spalování metanu CH <sub>4</sub> |                                |                |                               |   |                 |                                |                  |                                 |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|---|-----------------|--------------------------------|------------------|---------------------------------|
| CH <sub>4</sub>                  |                                | O <sub>2</sub> |                               |   | CO <sub>2</sub> |                                | H <sub>2</sub> O |                                 |
| 1                                | CH <sub>4</sub> +              | 1+4/4=2        | O <sub>2</sub>                | → | 1               | CO <sub>2</sub> +              | 4/2=2            | H <sub>2</sub> O                |
| kmol                             |                                | kmol           |                               |   | kmol            |                                | kmol             |                                 |
| 1*                               | 22,4                           | 2*             | 22,4                          |   | 1*              | 22,4                           | 2*               | 22,4                            |
|                                  | m <sup>3</sup> /kmol           |                | m <sup>3</sup> /kmol          |   |                 | m <sup>3</sup> /kmol           |                  | m <sup>3</sup> /kmol            |
| OBJ                              | 22,4                           |                | 44,8                          |   |                 | 22,4                           |                  | 44,8                            |
|                                  | m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> |                | m <sup>3</sup> O <sub>2</sub> |   |                 | m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> |                  | m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O |
| 1*                               | 12+4*1                         | 2*             | 2*16                          |   | 1*              | 12+2*16                        | 2*               | 2*1+16                          |
| kmol                             |                                |                |                               |   |                 |                                |                  |                                 |
| HMOT                             | 16                             |                | 64                            |   |                 | 44                             |                  | 36                              |
|                                  | kgCH <sub>4</sub>              |                | kgO <sub>2</sub>              |   |                 | kgCO <sub>2</sub>              |                  | kgH <sub>2</sub> O              |

Tabulka 3.2.2 Spalovací rovnice plynů z rozboru TŽ a vznik vodní páry, zdroj vlastní

| Plyn                           | Spalovací rovnice   | vodní pára z<br>1 kg<br>plynu[kg] | vodní pára z<br>1m3<br>plynu[kg] |
|--------------------------------|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| CH <sub>4</sub>                | $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow 1\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$                | 2,25                              | 1,607                            |
| H <sub>2</sub>                 | $\text{H}_2 + 5,0 \text{O}_2 \rightarrow 1\text{H}_2\text{O}$                             | 9                                 | 0,804                            |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | $\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$       | 1,286                             | 1,607                            |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>  | $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 1\text{H}_2\text{O}$     | 0,692                             | 0,804                            |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | $\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5 \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$    | 1,8                               | 2,411                            |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$       | 1,636                             | 3,214                            |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | $\text{C}_4\text{H}_{10} + 5,6 \text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$ | 1,552                             | 4,018                            |
| CO                             | $\text{CO} + 0,5 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$                                      |                                   |                                  |

Ve výše uvedené tabulce jsou stechiometrické spalovací rovnice, které jsou potřeba pro vypočítání množství a složení koksárenského, a vysokopecního plynu. Pro problematiku rosného bodu je v tabulce uvedeno i množství vzniklé vodní páry z reakcí při spalování. Spalováním oxidu uhelnatého žádná voda nevznikne, vznikne pouze oxid uhličitý.

### 3.3 Výpočet složek spalín z rozboru KP a VP

Tabulka 3.3.1 Laboratorní rozbor topných plynů, zdroj [9]

|                                | koksárenský<br>plyn | vysokopecní<br>plyn | zemní<br>plyn |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------|
|                                | [%obj.]             | [%obj.]             | [%mol]        |
| CO <sub>2</sub>                | 2,59                | 22,41               | 0,302         |
| O <sub>2</sub>                 | 1,49                | 0,86                |               |
| CO                             | 6,16                | 22,51               |               |
| CH <sub>4</sub>                | 21,87               | 0,02                | 96,503        |
| H <sub>2</sub>                 | 55,96               | 3,46                |               |
| N <sub>2</sub>                 | 8                   | 50,74               | 0,462         |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  | 2,41                |                     |               |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>  | 0                   |                     |               |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 1,13                |                     | 2,412         |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 0,31                |                     | 0,212         |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,08                |                     | 0,085         |

Ve výše uvedené tabulce je uveden rozbor jednotlivých plynů z laboratoře TŽ. V koksárenském ani ve vysokopecním plynu není uvedena vlhkost, což je z technického hlediska nemožné, protože koncovým stupněm úpravy každého plynu je mokrá pračka. Obsah vody v plynu dosahuje nejvyšších hodnot v letním období, což pochopitelně ovlivňuje rosný bod a celou ekonomii provozu kotle. [9]

### Výpočet množství a složení spalín z koksárenského plynu

Přebytek vzduchu:  $n = 1,2$ ; součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti:  $v = 1,03$ , koncentrace jednotlivých složek převzaty z tabulky č. 3.3.1. V následujících výpočtech je vypočteno skutečné množství spalovacího vzduchu, objem suchých a vlhkých spalín a složení vlhkých spalín.

Výpočet stechiometrického množství kyslíku:

$$V_{O_2,t} = 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6,5 \cdot C_4H_{10} - O_2$$

$$V_{O_2,t} = 0,5 \cdot 0,0616 + 0,5 \cdot 0,5596 + 2 \cdot 0,2187 + 3 \cdot 0,0241 + 3,5 \cdot 0,0113$$

$$+ 5 \cdot 0,031 + 6,5 \cdot 0,0008 - 0,0149 = 1,0052 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství teoretického vzduchu suchého:

$$V_{vz,t}^s = V_{O_2,t} \cdot \frac{100}{21} = 1,0052 \cdot \frac{100}{21} = 4,7864 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství skutečného vzduchu suchého:

$$V_{vz}^s = V_{vz,t}^s \cdot n = 4,7864 \cdot 1,2 = 5,7437 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství skutečného vzduchu vlhkého:

$$V_{vz} = V_{vz}^s \cdot v = 5,7437 \cdot 1,03 = 5,916 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství spalin teoretických suchých:

$$V_{CO_2} = CO + CO_2 + CH_4 + 2 \cdot C_2H_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10}$$

$$V_{CO_2} = 0,0616 + 0,0259 + 0,2187 + 2 \cdot 0,0241 + 2 \cdot 0,0113 + 3 \cdot 0,0031$$

$$+ 4 \cdot 0,0008 = 0,3895 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{N_2} = 0,08 + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s = 0,08 + 0,79 \cdot 4,7864 = 3,8613 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} = 0,3895 + 3,8613 = 4,2508 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství spalin skutečných suchých:

$$V_{sp}^s = V_{sp,t}^s + (n-1) \cdot V_{vz,t}^s = 4,2508 + (1,2-1) \cdot 4,7864 = 5,208 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství spalin skutečných vlhkých:

$$V_{H_2O} = H_2 + 2 \cdot CH_4 + 2 \cdot C_2H_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 5 \cdot C_4H_{10} + (v-1) \cdot V_{vz}^s$$

$$V_{H_2O} = 0,5596 + 2 \cdot 0,2187 + 2 \cdot 0,0241 + 3 \cdot 0,0113 + 4 \cdot 0,0031$$

$$+ 5 \cdot 0,0008 + (1,03-1) \cdot 5,7437 = 1,3794 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{sp} = V_{sp}^s + V_{H_2O} = 5,208 + 1,3794 = 6,5874 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Složení vlhkých spalin:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,3895}{6,5874} \cdot 100 = 5,913 \%$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s \cdot (n-1)}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{3,8613 + 0,79 \cdot 4,7864 \cdot 0,2}{6,5874} \cdot 100 = 70,097 \%$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot V_{vz,t}^s \cdot (n-1)}{6,5874} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot 4,7864 \cdot 0,2}{6,5874} \cdot 100 = 3,052 \%$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{1,3794}{6,5874} \cdot 100 = 20,99 \%$$



## Výpočet množství a složení spalín z vysokopecního plynu

Přebytek vzduchu:  $n = 1,15$ ; součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti:  $v = 1,03$ , koncentrace jednotlivých složek převzaty z tabulky č. 3.3.1. V následujících výpočtech je vypočteno skutečné množství spalovacího vzduchu, objem suchých a vlhkých spalín a složení vlhkých spalín.

Výpočet stechiometrického množství kyslíku:

$$V_{O_2,t} = 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 - O_2$$
$$V_{O_2,t} = 0,5 \cdot 0,2251 + 0,5 \cdot 0,0346 + 2 \cdot 0,0002 - 0,0086 = 0,12165 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství teoretického vzduchu suchého:

$$V_{vz,t}^s = V_{O_2,t} \cdot \frac{100}{21} = 0,12165 \cdot \frac{100}{21} = 0,5793 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství skutečného vzduchu suchého:

$$V_{vz}^s = V_{vz,t}^s \cdot n = 0,5793 \cdot 1,15 = 0,6662 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství skutečného vzduchu vlhkého:

$$V_{vz} = V_{vz}^s \cdot v = 0,6662 \cdot 1,03 = 0,6862 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství spalín teoretických suchých:

$$V_{CO_2} = CO + CO_2 + CH_4 = 0,2251 + 0,2241 + 0,0002 = 0,4494 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s = 0,5074 + 0,79 \cdot 0,5793 = 0,965 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} = 0,4494 + 0,965 = 1,4144 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství spalín skutečných suchých:

$$V_{sp}^s = V_{sp,t}^s + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^s = 1,4144 + (1,15 - 1) \cdot 0,5793 = 1,5013 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Množství spalín skutečných vlhkých:

$$V_{H_2O} = H_2 + 2 \cdot CH_4 + (\nu - 1) \cdot V_{vz}^s$$

$$V_{H_2O} = 0,0346 + 2 \cdot 0,0002 + (1,03 - 1) \cdot 0,6662 = 0,055 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

$$V_{sp} = V_{sp}^s + V_{H_2O} = 1,5013 + 0,055 = 1,5563 \text{ m}_N^3 \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Složení vlhkých spalín:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,4494}{1,5563} \cdot 100 = 28,876 \%$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s \cdot (n - 1)}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,965 + 0,79 \cdot 0,5793 \cdot 0,2}{1,5563} \cdot 100 = 67,887 \%$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot V_{vz,t}^s \cdot (n - 1)}{V_{sp}} = \frac{0,21 \cdot 0,5793 \cdot 0,2}{1,5563} \cdot 100 = 1,5633 \%$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{sp}} \cdot 100 = \frac{0,055}{1,5563} \cdot 100 = 3,534 \%$$

### Množství spalín a spalovacího vzduchu při zkoušce č. 6.

Při zkoušce č. 6 bylo spalováno 4073 m<sup>3</sup>/h koksového plynu a 50176 m<sup>3</sup>/h vysokopecního plynu. Měřené množství spalovacího vzduchu 65645 N m<sup>3</sup>/h.

Celkové množství spalovacího vzduchu

$$V_{vz}^c = V_{vzKP} \cdot 4073 + V_{vzVP} \cdot 50176 = 5,916 \cdot 4073 + 0,6862 \cdot 50176 = 58526,64 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Toto vypočtené množství spalovacího vzduchu je minimální, není stejné jako měřené kotlem K1, kde je množství asi 1,1 násobně vyšší, než vypočtené. Toto přisuzuji záměrnému malému nadhodnocování množství spalín konstruktéry kotle, chybám provozních měření a přísávání vzduchu netěsnostmi.

Celkové množství spalin

$$V_{sp}^c = V_{spKP} \cdot 4073 + V_{spVP} \cdot 50176 = 6,5874 \cdot 4073 + 1,5563 \cdot 50176 = 78155,74 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Provozní měření celkového množství spalin operátor na obrazovce nevidí. Tudíž tento výpočet nelze úplně ověřit. Nicméně zde bude také menší množství spalin, než je skutečné, protože i množství spalovacího vzduchu bylo zhruba 1,1 krát větší než výpočet.

## 4 Současný stav kotle K1

Kotel K1 byl po měření rosného bodu centrem ENET dále provozován v běžném provozu. Teplota za spalin za ohřívacem je nastavená výše, než před zanesením. V říjnu a listopadu 2018 byl kotel odstaven za účelem výměny trubek LUVA. Bylo vyměněno zhruba 2/3 trubek ze strany vstupu studeného spalovacího vzduchu. Po najetí kotle se zase provozuje v normálním provozním režimu a při odstávce na začátku června 2019 proběhne kontrola zanesení trubek LUVA, zhodnocení závažnosti a rychlosti zanášení a případné investice pro doplňkovou úpravu teploty spalovacího vzduchu před ohřívacem vzduchu.

Úpravou klapky obtoku EKO1, rozdělením na dvě, části bylo dosaženo menšího kolísání teploty spalin za ohřívacem vzduchu a tím menší četnosti podkračování rosného bodu spalin. Regulace teploty spalin procházejícího ohřívacem je teď plynulejší a citlivější.

Z důvodu zpřísnění emisních limitů  $\text{NO}_x$  od roku 2021 probíhají úpravy a zkoušky spějící ke snížení obsahu  $\text{NO}_x$  ve spalinách při současném hoření zemního a koksárenského plynu. Jedním z opatření je snižování teploty spalovacího vzduchu částečným otevíráním klapek obtoků ohříváče vzduchu při vysoké koncentraci oxidů dusíku ve spalinách. Tím se snižuje množství spalovacího vzduchu, které prochází ohřívacem a dochází ke zmírnění poškozování trubek ohříváče vzduchu.



*Obrázek 4.1 Nové trubky výměníku LUVO, zdroj: vlastní*

## Závěr

Měření rosného bodu spalin bylo provedeno sondou LANDCOM 200 s řízenou teplotou povrchu čidla. Čidlo detekuje kondenzaci par složek spalin na povrchu čidla. V prostoru umístění čidla ve spalinovém kanálu byla současně měřena teplota spalin a teplota rosného bodu spalin.

Umístění čidla bylo zvoleno na základě měření rozložení teplot v místě s nejnižší teplotou spalin. Zvolen byl měřicí otvor blíže přední stěny spalinového kanálu, na pravé straně kotle, hloubka zasunutí ve spalinovém kanálu byla cca 1,2m. V místě měření byla vždy detekována teplota spalin o cca 30°C nižší než provozní měření teploty spalin na výstupu z kotle. Důvodem tohoto rozdílu teplot je přívod studeného vzduchu do ohřívače spalin kotle K1. Studený vzduch vstupuje ze strany vedle II tahu kotle a tím je u stěny II. tahu kotle vždy nižší teplota vzduchu než u stěny zadní. Jak ukázalo měření teplot ve spalinovém kanálu, rozdíl teplot dosahuje až 100°C a to u pravé strany 3. tahu. Provozní měření teploty ve spalinovém kanále ukazuje přibližně střední teplotu spalin. Ke kondenzaci vodní páry ve spalinách bude docházet ze směru stany vedle II. tahu kotle směrem dozadu. Je to způsobeno způsobem přivedení studeného vzduchu do ohříváku

Koncentrace vodní páry ve spalinách má dominantní vliv na teplotu rosného bodu. Výrazně vyšší teplotu, při které dochází ke kondenzaci vodní páry ve spalinách (rosný bod), mají topné plyny s vyšším obsahem vodíku v surovém plynu. Jsou to zejména koksárenský plyn a zemní plyn. Nízký obsah vodíku v surovém plynu mají vysokopecní a konvertorový plyn. U těchto plynů dochází ke kondenzaci výjimečně, protože rosný bod mají poměrně nízko. Ke koncentraci vodíku v surovém plynu je nutno vzít v potaz i koncentraci vodní páry. Obě tyto složky nepříznivě ovlivňují teplotu rosného bodu. Teplota vzorku koksárenského plynu, při které se v laboratořích stanovují výhřevnost, vlhkost a další parametry je 15°C. Tento laboratorní vzorek je odlišný od dodávaného surového plynu do směsné stanice a do kotle. Rozbory plynů z laboratoří TŽ obsah vody ve vzorku neuvádí. Obsah vody v koksárenském plynu závisí na koncové teplotě mokré pračky a především na venkovní teplotě. Obsah vodní páry v surovém plynu je nejvýznamnější v letních měsících.

Kondenzát z vodní páry a vodíku ve spalinách neobsahuje pouze vodu, ale obsahuje i zkondenzované a rozpuštěné kyselé složky spalin a aerosoly, které způsobují zanášení spalinové části ohříváku vzduchu a urychlují nízkoteplotní korozi. Z prachových částic přítomných ve spalinách se stávají kondenzační jádra, která na sebe vážou kapalně složky

kondenzátu. Tímto zvyšují teplotu rosného bodu a urychlují zanášení a korozi. Tvrdé nánosy a koroze studených částí ohřívačku jsou důsledkem střídání podkročování a překračování rosného bodu. V obdobích, kdy jsou na koksově nefunkční odsiřovací zařízení, a koncentrace  $\text{H}_2\text{S}$  v koksovém plynu jsou až  $2500\text{mg/m}^3$  má jakékoli podkročování rosného bodu za následek rychlejší zanášení trubek než při funkčním odsiřovacím zařízení kdy je koncentrace  $\text{H}_2\text{S}$  průměrně  $50\text{mg/m}^3$ .

Teplota spalin v místě měření rosného bodu na výstupu spalin před sáním spalínového ventilátoru se pohybovala od  $66$  do  $111^\circ\text{C}$ . Teplota spalin se odvíjí od výkonu kotle, teploty nasávaného vzduchu, polohy klapky obtoku EKO, typu spalovaného plynného paliva a částečně i na přebytku vzduchu.

Rosný bod naměřený ve spalinách se při jednotlivých zkouškách pohyboval v rozmezí od  $28$  do  $55^\circ\text{C}$ , výše rosného bodu korespondovala s podílem spalovacích plynů a tím i s podílem vodní páry ve spalinách. V tabulce č. 2.9.1, je vypočtená hodnota rosného bodu pro měřené provozní stavy. „*Výpočet obsahu vodních par ve spalinách byl proveden dle stechiometrického výpočtu, dle složení a poměrů spalovaných plynů a obsahu kyslíku dle provozního měření před LUVO*“.<sup>[9]</sup> Rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami mohly vzniknout nehomogenitou směsí paliv, odlišným obsahem vlhkosti plynu oproti vypočtené hodnotě a přesnosti měření danou čistotou plochy čidla. Celkový rozdíl mezi naměřenou a vypočtenou hodnotou rosného bodu není velký.

Při porovnání naměřených hodnot rosného bodu spalin a vypočtených hodnot z tabulky č. 2.9.1 je možno konstatovat, že hodnoty rosného bodu jsou jednoznačně hodnotami rosného bodu vodních par ve spalinách, nikoliv kyselého rosného bodu. Fyzickou kontrolou ohřívačku vzduchu K1 bylo zjištěno, že v oblasti vyšších povrchových teplot ohřívačku se kyselý rosný bod neprojevuje, z důvodu nízkých koncentrací kyselých složek ve spalinách. Kyselé složky mohou být  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$  a jejich sloučeniny s tuhými částicemi přítomnými v plynu nebo v materiálu trubek ohřívačku. Uvedené kyselé složky ve spalinách významně urychlují korozi trubek ohřívačku vzduchu v oblasti rosného bodu vodní páry.

Spalovací vzduch lze nasávat buďto venkovní, nebo z prostoru kotelní. V zimním období kotel nasává spalovací vzduch z prostoru kotelní. Teplota nasávaného vzduchu se pohybuje v zimě cca od  $30$  do  $35^\circ\text{C}$  v letním období v závislosti na venkovní teplotě. V průběhu měření se teplota nasávaného vzduchu měřená provozním měřením pohybovala kolem  $36$  až  $37^\circ\text{C}$  při venkovní teplotě vzduchu  $2^\circ\text{C}$ . Z teplot rosného bodu v rozmezí  $55$

až 66°C (jak naměřených tak vypočtených) lze usoudit, že v ohříváku vzduchu musí vždy docházet ke kondenzaci vodní páry v části vstupu studeného spalovacího vzduchu. V místě kondenzace spalin dochází k zanesení ohříváku a tím ke zhoršení tepelné vodivosti. Teplota trubek v zaneseném místě se o něco zvýší, ale studené místo se posune hlouběji do trubkového svazku ohříváku vzduchu.

Pro lepší diagnostiku teploty výstupních spalin před sáním SV, by do místa s nejnižší teplotou spalin měl být umístěn teploměr, jehož teplota by byla vyvedena na obrazovku operátora a do řídicího systému kotle. Stávající provozní měření by zůstalo, protože ukazuje zhruba střední teplotu.

Ohříváč vzduchu má na přívodu vzduchu nainstalovány obtokové klapky, kterými lze vyřadit jednotlivé části ohříváku z provozu buďto částečně, nebo úplně. Obtoky byly v průběhu zkoušek zavřené a spalovací vzduch procházel napřed druhým dílem ohříváku vzduchu, a potom prvním dílem ohříváku vzduchu. Při spalování vyššího množství koksárenského plynu (nad 8000<sub>N</sub>m/h) společně s vysokopecním, nebo zemním plynem může operátor otevřením obtokových klapek omezit kondenzaci vodní páry spalin v ohříváku, tím ale zhorší účinnost kotle.

Řešením situace by mohlo být nainstalování parního ohříváče vzduchu. Nasávaný studený vzduch za vzduchovým ventilátorem ohřát pomocí páry 3ATA v kondenzačním ohříváči. Tímto by rozhodně šlo ohřát vzduch nad teplotu rosného bodu spalin. Regulací teploty ohřátého vzduchu by se zachovala vysoká účinnost kotle. Celková účinnost kotle by v konečném důsledku mírně klesla.

Další variantou ke zvážení by mohla být recirkulace části ohřátého vzduchu a následné směšování vzduchu se studeným nasávaným vzduchem za spalinovým ventilátorem. Toto řešení by nejspíš vyžadovalo instalaci recirkulačního ventilátoru spalovacího vzduchu.

Další možná varianta může být rekonstrukce kotle na kondenzační kotel. Současně by se zvýšila účinnost kotle a tím celá ekonomika provozu. Toto řešení je potřeba zhodnotit technicko- ekonomickou studií.

## Seznam použité literatury a zdrojů:

- [1] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Skripta ČVUT, Praha 2011, ISBN 978-80-01-03757-7
- [2] RAJNIAK, I. a kol. *Tepelno- energetické a emisné merania*. Bratislava: Ister Science, 1997. ISBN 80-88683-20-3
- [3] VILIMEC, L. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Skripta VŠB-TU, Ostrava 2008, ISBN 978-80-248-1853-5
- [4] IBLER, Zbyněk. *Technický průvodce energetika*. [1. díl]. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-026-1
- [5] KISZA J., NOGAWCZYK P. *Místní provozní předpis(řád): Plynová kotelná Teplárny E2*, rev. 7, Energetika Třinec a.s., Třinec 2015
- [6] OCHRANA L. *Kotle a výměníky tepla*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 2004. ISBN 80-214-2847-3
- [7] MACEK, L., RAAB, P. *Omezování emisí oxidu siřičitého*. Ministerstvo lesního a vodního hospodářství ČSR. Státní zemědělské nakladatelství. Praha, 1985.
- [8] ŠÍŠKA, F. *Ochrana ovzdušia*. 1.vyd. Bratislava: ALFA- SNTL, 1981
- [9] ČECH B. *zpráva z měření katedry energetiky VŠB-TU*, Ostrava 2017
- [10] MLNAŘÍK J., HRUŠKA J. *Přímé měření kyselého rosného bodu ve spalovacích zařízeních* [Online]. SVÚM a.s., Praha 2012. DOI: 10.2478/v10227-011-0004-9 Dostupné z: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/kom.2012.56.issue-1/v10227-011-0004-9/v10227-011-0004-9.pdf>
- [11] *Energetické výzkumné centrum* [online]. Spalovací rovnice plynná paliva Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/196-sr-plynnna-paliva-1.pdf>
- [12] AMETEK Land, *Lancom 200 Sulphuric Acid Dewpoint Monitor Brochure* [Online]. Dostupné z <https://www.ametek-land.com/products/combustionefficiencymonitors/lancom200>
- [13] *Integrovaný registr znečišťování* [online]. Ministerstvo životního prostředí, CENIA Česká informační agentura životního prostředí. Látka: Oxidy síry. Dostupné z <https://www.irz.cz/node/08>
- [14] *U.S. Environmental Protection Agency* [online]. Sulfur dioxide. Dostupné z <https://www.epa.gov/so2-pollution>



## Seznam obrázků

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <i>Obrázek 1.8.1 Obtoky ohříváku a ohřívák z obrazovky operátora, zdroj vlastní. ....</i>   | 15                         |
| <i>Obrázek 1.10.1 Schéma kotle K1, zdroj[5] .....</i>   | 17                         |
| <i>Obrázek 1.13.1 Zanesení trubek výměníku zdroj: vlastní .....</i>   | 21                         |
| <i>Obrázek 1.13.2 Zanesení LUVA po otevření vlezu v prostoru mezi LUVY, zdroj: ET.a.s.<br/>.....</i>  | 21                         |
| <i>Obrázek 1.14.1 Rozložení teplot na sání SV [°C], zdroj: vlastní .....</i>  | 23                         |
| <i>Obrázek 2.4.1 Místo měření zdroj: vlastní .....</i>  | 31                         |
| <i>Obrázek 2.5.1 Sonda Landcom 200 – sonda zdroj:[9] .....</i>  | 32                         |
| <i>Obrázek 2.5.2 Sonda Landcom 200. Čidlo - detektor rosného bodu sondy s platinovými<br/>elektrodami (kruhová elektroda obklopující plochou elektrodu) zdroj[9],[12] .....</i> | 32                         |
| <i>Obrázek 2.5.3 Zobrazovací jednotka sondy Landcom 200 zdroj[9] .....</i>  | 32                         |
| <i>Obrázek 4.1 Nové trubky v ohříváči vzduchu zdroj: vlastní</i>  | <b>Chyba! Záložka není</b> |
| <b>definována.</b>  |                            |

## Seznam tabulek

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Tabulka 2.7.1 Označení jednotlivých zkoušek zdroj: [9] .....</i>                         | <i>33</i> |
| <i>Tabulka 2.9.1 Výsledky měření rosného bodu spalin [9] .....</i>                          | <i>36</i> |
| <i>Tabulka 3.2.1 Spalovací rovnice metanu, zdroj [11] .....</i>                             | <i>37</i> |
| <i>Tabulka 3.2.2 Spalovací rovnice plynů z rozboru TŽ a vznik vodní páry, zdroj vlastní</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabulka 3.3.1 Laboratorní rozbor topných plynů, zdroj [9] .....</i>                      | <i>38</i> |